

Preventive maintenance planning using genetic algorithms Planeamento da manutenção preventiva usando algoritmos genéticos

António Abreu - ajfa@dem.isel.pt

ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa / Instituto de Desenvolvimento de Novas Tecnologias

J. M. F. Calado - jcalado@dem.isel.ipl.pt

ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa / IDMEC/LAETA - IST

Eduardo Pêgo - a35493@alunos.isel.pt

ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Abstract

Given the inherent difficulties of develop preventive maintenance plans appropriate to the use of equipment, this paper presents a methodology based on the minimum cost criterion for determining the optimal intervals of preventive maintenance as a function of the equipment use. The optimization of the model developed was carried out through the use of genetic algorithms, and their implementation was performed using the computing platform Matlab. To facilitate the interface between the user and the computer platform implemented a graphical user interface was developed using the visual interface tool (GUIDE) available in the Matlab computing platform. In order to assess the robustness of the proposed methodology, it was used as a case study a condensed chiller equipment to air, responsible for the air conditioning of a secondary school and presented the corresponding results obtained and made its critical analysis. The results obtained allow us to predict the success of the proposed methodology in the definition of preventive maintenance plans of equipment depending on its use, minimizing its cost.

Resumo

Dadas as dificuldades intrínsecas à elaboração de planos de manutenção preventiva adequados à utilização dos equipamentos, este artigo apresenta uma metodologia baseada no critério do custo mínimo para determinar os intervalos óptimos de manutenção preventiva em função da utilização do equipamento. A optimização do modelo desenvolvido foi realizada recorrendo à utilização de algoritmos genéticos, tendo a sua implementação sido efectuada utilizando a plataforma computacional Matlab. Para facilitar a interface entre o utilizador e a plataforma computacional implementada foi desenvolvida uma interface gráfica utilizando a ferramenta de interface visual (GUIDE) disponível na plataforma computacional Matlab. Com o objectivo de avaliar a robustez da metodologia proposta, foi utilizado como caso de estudo um equipamento chiller condensado a ar, responsável pela climatização de uma escola secundária, sendo apresentados os correspondentes resultados obtidos e efectuada a sua análise crítica. Os resultados obtidos permitem antever o sucesso da metodologia proposta na definição de planos de manutenção preventiva de equipamentos em função da sua utilização, minimizando o seu custo.

Keywords

Preventive maintenance, genetic algorithms, minimum cost, chiller

Palavras-chave

Manutenção preventiva, algoritmos genéticos, custo mínimo, chiller

Planeamento da manutenção preventiva usando algoritmos genéticos

1. Introdução

Actualmente, a rápida evolução da tecnologia e a crescente automação dos equipamentos revelam uma tendência para a sofisticação e complexidade dos processos produtivos.

Por outro lado, como as actividades de manutenção introduzem custos, os gestores de manutenção devem definir estratégias/planos de manutenção que sejam suportadas numa análise cuidadosa de custo-benefício da função de manutenção. Assim, para responder ao problema de como definir uma estratégia/plano de manutenção que tenha como objectivo uma minimização dos custos e uma maximização dos benefícios surgiram várias filosofias/metodologias como é caso da Manutenção Centrada na Fiabilidade [1], a Manutenção Produtiva Total [2], Manutenção baseada na Condição [3], RAMS [4], Manutenção Baseada no Risco [5], entre outras.

Em termos operacionais, a definição de um plano de manutenção preventiva sistemática tem por base a premissa que é aceite por todos os especialistas da área da Manutenção que existe um impacto positivo na fiabilidade dos equipamentos quando estes são sujeitos com uma determinada periodicidade a intervenções de manutenção. No entanto, a elaboração desse plano requer que seja definido com algum rigor uma vez que: a afetação de um número elevado de intervenções conduz não só a um aumento dos custos de manutenção excessivo como também leva a uma redução da disponibilidade dos equipamentos. Por outro lado, a afetação de um número reduzido de intervenções de manutenção, conduz a um aumento da ocorrência de falhas aleatórias, que por sua vez se vai traduzir não só numa redução da disponibilidade do equipamento, aonde num contexto em que a operacionalidade do equipamento é crítico para o sucesso da organização vai amplificar os impactos negativos resultantes da sua indisponibilidade como também produz um aumento dos custos da manutenção, resultantes do incremento em acções de manutenção correctiva [6].

Dada a relevância do tema, relacionada com a dificuldade na elaboração de um plano de manutenção preventiva adequada à utilização dos equipamentos, este artigo apresenta uma metodologia baseada no critério do custo mínimo para determinar os intervalos óptimos de manutenção preventiva em função da utilização do equipamento. O modelo desenvolvido foi optimizado recorrendo aos algoritmos genéticos e foi computado utilizando a plataforma computacional Matlab.

2. Critérios de suporte à elaboração de um plano de manutenção

De acordo com Endrenyi [6], existem diversos critérios para a elaboração de um plano de manutenção. No entanto, as duas principais perspectivas que suportam a definição dos intervalos óptimos de manutenção preventiva sistemática são baseadas em dois critérios: os critérios de decisão baseados no custo mínimo e na disponibilidade máxima.

2.1 Critério da disponibilidade máxima

De acordo com Kay [7] a disponibilidade máxima entre duas intervenções de manutenção correctiva A_c é dada pela seguinte equação:

$$A_c = \frac{M}{M + m} \quad (1)$$

onde,

A_c - Disponibilidade máxima entre duas intervenções de manutenção correctiva;

M - Tempo médio de falha, do inglês *Mean Time to Failure* (MTTF);

m - Tempo médio de manutenção de uma reparação correctiva.

No caso de uma manutenção preventiva, a disponibilidade máxima entre duas intervenções de manutenção preventiva A_p é dada pela seguinte equação:

$$A_p = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + m_p R(T) + m[1 - R(t)]} \quad (2)$$

onde,

A_p - Disponibilidade máxima entre duas intervenções de manutenção preventiva;

m_s - Tempo médio de uma intervenção de manutenção preventiva;

m - Tempo médio de manutenção de uma reparação correctiva;

$R(t)$ - Fiabilidade do componente ou sistema;

\bar{T} - Tempo médio acumulado de funcionamento até à falha, obtido através da seguinte equação:

$$\bar{T} = \int_0^t R(t) dt \quad (3)$$

O critério de decisão para a disponibilidade máxima obtém-se respeitando a seguinte condição:

$$A_p - A_c > 0 \quad (4)$$

Sempre que se verifique a condição (4) é preferível realizar uma operação de manutenção preventiva, onde o objectivo passa por maximizar a equação (2).

2.2 Critério do custo mínimo

Considerando que os equipamentos devem gerar um retorno económico, outra forma de olhar para o problema passa por tentar minimizar os custos de manutenção do equipamento.

Se considerarmos que quando é realizada uma operação de manutenção correctiva num dado equipamento C_c , o custo dessa intervenção pode ser estimado através da seguinte equação:

$$C_c = \frac{c_c \times m_c}{M + m} \quad (5)$$

onde,

C_c - Custo médio de manutenção correctiva;

M - Tempo médio de falha, do inglês *Mean Time to Failure* (MTTF);

m_c - Tempo médio de manutenção de uma reparação correctiva;

c_c - Custo por unidade de tempo, seguindo uma politica de manutenção correctiva.

No caso de uma acção de manutenção preventiva, o custo da intervenção C_p pode ser estimado através da seguinte equação:

$$C_p = \frac{[1 - R(t)]m_c \times c_c + R(t)m_p c_p}{\bar{T} + m_p R(t) + m_c [1 - R(t)]} \quad (6)$$

onde,

C_p - Custo médio de manutenção preventiva;

m_p - Tempo médio de reparação para uma manutenção preventiva;

m_c - Tempo médio de reparação de uma reparação correctiva;

c_p - Custo por unidade de tempo, seguindo uma politica de manutenção preventiva;

c_c - Custo por unidade de tempo, seguindo uma politica de manutenção correctiva;

\bar{T} - Tempo médio acumulado de funcionamento até à falha, obtido pela equação (3);

$R(t)$ - Fiabilidade do sistema, no instante de tempo (t) considerado.

Neste caso o critério de decisão é dado pela seguinte condição:

$$C_p - C_c < 0 \quad (7)$$

Caso a condição (7) se verifique, é preferível a realização de uma manutenção preventiva em detrimento de uma operação correctiva.

No entanto, estes critérios são antagónicos uma vez que as condições que minimizam o custo são contrárias às que maximizam a disponibilidade [8]. De modo a aproximar estas duas perspectivas, vários autores propõem adição de uma restrição de fiabilidade mínima nos dois critérios [9]. Outros propõem a utilização de técnicas multiobjectivo atribuindo um determinado peso a cada critério e depois obter a solução que devolva o menor custo, com a maior disponibilidade, respeitando a fiabilidade mínima imposta e os pesos atribuídos a cada critério de decisão [10].

3. Algoritmo proposto

O modelo proposto no presente artigo é uma adaptação dos trabalhos realizados por Tsai *et al.* [11] cujo objectivo é determinar os intervalos óptimos de manutenção preventiva baseado no critério de decisão do custo mínimo.

Assim, a função objectivo do modelo proposto é representada pela seguinte equação:

$$MIN CM = CMC + CMP \quad (8)$$

onde,

CM - Custo total do plano de manutenção;

CMC - Custo total das manutenções correctivas efectuadas;

CMP - Custo total das manutenções preventivas efectuadas.

Assim, se definirmos i como o período de manutenção de tal forma que $i = 1, 2, 3, \dots, n$, em que n é o ultimo período de manutenção, definindo t_i como o instante temporal do período de manutenção i e t_{i-1} como o instante de tempo do período de manutenção imediatamente anterior, $i - 1$, o custo de cada intervenção de manutenção preventiva, CMP , para cada período de manutenção i é dado pela seguinte equação:

$$CMP_i = \sum_{j=1}^k C_{ij} \quad (9)$$

Onde o somatório corresponde ao somatório dos custos das actividades de manutenção relativas a cada período de manutenção i até à k ésima operação de manutenção j . A Tabela 1 ilustra os custos associados a várias operações de manutenção preventiva, para cada período de manutenção i .

Tabela 1 - Operações de Manutenção Preventiva

Período de Manutenção (i)	Operações de Manutenção Preventiva					
	Limpeza	Lubrificação	Calibração	Alinhamento	Pequenas Reparações	Overhaul
1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}
2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}	C_{26}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	C_{n1}	C_{n2}	C_{n3}	C_{n4}	C_{n5}	C_{n6}

Para a determinação do custo associado a cada intervenção de manutenção correctiva para cada período de manutenção i , é necessário subdividir o sistema em componentes candidatos a uma política de manutenção preventiva e componentes cuja taxa de falhas não depende do tempo e para os quais a realização de intervenções preventivas não é benéfica. Cada componente m candidato a uma política de manutenção preventiva é modulado através da sua taxa de risco h_m , enquanto os restantes componentes seguem uma política de manutenção correctiva, considerando que seguem uma distribuição exponencial com taxa de falhas λ constante [11].

Com base nas condições anteriores, o custo de uma manutenção correctiva CMC no período de manutenção i , sujeita a um conjunto k de operações de manutenção j é dado pela equação:

$$CMC_i = \sum_{j=1}^k C_{ij} \left(\int_{t_{i-1}}^{t_i} \lambda(t) dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} h_{mi}(t) dt \right) \quad (10)$$

onde,

CMC_i - Custo de uma manutenção correctiva CMC , no período de manutenção i ;

C_{ij} - Custos j de uma manutenção correctiva relativos ao período manutenção i para a operação de manutenção j , descritos na Tabela 1;

$h_{mi}(t)$ - Taxa de risco (*hazard rate*) do componente m , no período de manutenção i , sujeito a uma política de manutenção preventiva;

$\lambda(t)$ - Taxa de falha dos componentes que não são candidatos a uma política de manutenção preventiva, para os quais o padrão de falhas não apresenta desgaste [12], sujeitos a uma política de manutenção correctiva, uma vez que apresentam um comportamento aleatório de falha, não dependente da vida acumulada do sistema, modelados através de uma função exponencial negativa [11];

t_i - Instante de tempo (ex.: horas, dias, semanas) do período de manutenção i ;

t_{i-1} Instante inicial de tempo do período de manutenção anterior $i - 1$;

k - Número total de actividades realizadas durante o período de manutenção i .

Substituindo na equação (8) as equações (9) e (10) o custo total de manutenção CM ao fim de n períodos de manutenção é dado por:

$$CM = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k C_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k C_{ij} \left(\int_{t_{i-1}}^{t_i} \lambda(t) dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} h_{mi}(t) dt \right) \quad (11)$$

Onde n é o número intervenções realizadas durante a duração do plano de manutenção.

3.1 Conceito de Manutenção perfeita e imperfeita.

No caso de um sistema reparável, quando são detectados componentes danificados ou em estado avançado de degradação, resultante de uma operação de manutenção correctiva ou planeada, a intervenção de manutenção pode passar pela reparação, caso se justifique do ponto de vista técnico ou económico, ou então como alternativa pela substituição total ou parcial dos componentes identificados [13].

De acordo com alguns autores [1,14], quando é realizado uma intervenção de manutenção a um sistema reparável, admitem nos seus modelos que a intervenção de manutenção consegue remover todo o dano acumulado pelo sistema até à data da intervenção, devolvendo-o a uma condição denominada de “tão bom como novo”, ou seja, é assumido que a manutenção é perfeita.

No entanto, na prática esta premissa na maior parte das situações não é verdadeira uma vez que as intervenções de manutenção vão introduzir um aumento de fiabilidade do equipamento que se vai situar entre o estado anterior à intervenção e o estado tão bom como novo [9].

Assim, em função do nível de reparação/intervenção que um sistema reparável é sujeito, podemos então classificar as intervenções de manutenção em três níveis:

Manutenção perfeita - Corresponde a uma intervenção de manutenção que consegue remover todo o dano acumulado pelo equipamento até à data da intervenção, devolvendo-o a uma condição denominada de “tão bom como novo” ou em inglês “*As Good as New*” (AGAN).

Manutenção mínima - Corresponde a uma intervenção de manutenção que apenas corrige a falha existente, sem retirar nenhum tipo de dano acumulado, devolvendo o equipamento ao estado imediatamente anterior à ocorrência de uma falha, denominado “tão mau como estava” ou “*As Bad as Old*” (ABAO). Ou seja, neste caso o objectivo da intervenção de

manutenção é permitir que o sistema cumpra a sua função requerida durante um intervalo de tempo limitado, até que a reparação seja efectuada.

Manutenção imperfeita - Corresponde a uma intervenção de manutenção em que ocorre uma remoção parcial de dano acumulado. O dano removido é dado pelo denominado coeficiente de remoção de dano, designado pela letra q . Na literatura, existem vários modelos matemáticos que permitem modular a manutenção imperfeita [9], [15].

3.2 Modelação da manutenção imperfeita.

Com o objectivo de modelar a manutenção imperfeita recorreu-se ao “método de vida virtual do sistema”, proposto por Kijima [15]. Este modelo assenta no conceito de vida virtual de um sistema reparável [13]. A vida virtual de um sistema, num determinado período de tempo t_i , no período de manutenção i , é o valor de dano acumulado que a intervenção de manutenção realizada no período de manutenção i não conseguiu retirar ao sistema. A quantidade de dano retirado em cada período de manutenção i depende da eficiência de cada operação de manutenção. Assim sendo, para cada intervalo de manutenção i , a vida virtual V_i do sistema é dada pela seguinte equação:

$$V_i = q(V_{i-1} + T) \quad (12)$$

onde,

V_{i-1} - Vida virtual do sistema no período anterior de manutenção;
 T - Período de tempo decorrido entre dois intervalos de manutenção;
 q - Factor de remoção de dano da operação de manutenção, quando;

- $q = 0$, descreve o caso de uma manutenção perfeita;
- $0 < q < 1$, representa uma manutenção imperfeita;
- $q = 1$, descreve o caso de reparação mínima.

A eficiência da operação de manutenção (q) pode ser estimada a partir dos dados de reparação do equipamento em análise, seguindo o modelo aritmético de redução de vida desenvolvido por Doyen *et al.* [16].

3.3 Modelo de optimização

Se considerarmos X_i como a operação de manutenção X a efectuar no período de manutenção i , a optimização da equação (11) é dada pela seguinte equação:

$$\text{MIN } CM(X_1, X_2, X_3 \dots X_n) = CMC + CMP \quad (13)$$

Sujeito a,

$$R(t) \geq R_{min} \quad (14)$$

onde,

CM - Custo total do plano de manutenção;

$X_1, X_2, X_3 \dots X_n$ - Definem as intervenções de manutenção realizadas em cada intervalo temporal considerado;

$R(t)$ - Fiabilidade do sistema.

R_{min} - Fiabilidade mínima que o sistema pode atingir e que é previamente definida pela gestão;

CMC - Custo de uma manutenção correctiva no período de manutenção i ;

CMP - Custo de uma manutenção preventiva no período de manutenção i .

Na construção do algoritmo proposto, foram consideradas três tipos de decisões quanto ao planeamento da manutenção preventiva, quando o valor associado às intervenções de manutenção X_i é:

$X_i = 0$, Implica que não são afectados recursos nesse período para realizar uma intervenção de manutenção planeada. Logo, o factor de redução de dano (q) vai ser igual a 1;

$X_i = 1$, Implica a afectação dos recursos necessários à realização de uma operação de manutenção planeada imperfeita. Logo, o factor de redução de dano (q) vai estar compreendido entre $0 < q < 1$;

$X_i = 2$, Implica a afectação dos recursos necessários à realização de uma operação de manutenção planeada perfeita, ou seja, uma operação de *overhaul* ao sistema. Logo, o factor de redução de dano (q) vai ser igual a 0.

Para cada intervalo de manutenção X_i , o período de tempo i avança t unidades temporais, um valor de tempo constante, que pode ser medido em horas, dias, meses ou outras unidade de medida temporal. Este valor é definido pelo utilizador.

4 Implementação do algoritmo

Com o objectivo de implementar o modelo proposto recorreu-se aos algoritmos genéticos como ferramenta de optimização. O processo de optimização baseado nos algoritmos genéticos tem como princípio o modelo de evolução de espécies proposto por Charles Darwin, onde os indivíduos mais fortes têm maior probabilidade de sobrevivência e reprodução do que os indivíduos mais fracos [17].

Ao utilizar uma população de potenciais soluções, os algoritmos genéticos aumentam a probabilidade de obter uma aproximação razoável ao mínimo global da função, diminuindo o risco da optimização devolver um dos mínimos locais da função a ser minimizada [11].

Segundo [17] a optimização é iniciada com criação de uma população inicial, onde cada individuo é uma potencial solução do problema. Seguidamente, o grupo de indivíduos que compõem a população competem entre si pelo direito de reprodução ou de passarem para a nova geração. A escolha dos indivíduos é feita a partir do seu *fitness*, e passarão à próxima geração os indivíduos que apresentarem o melhor valor de *fitness*.

A nova geração é construída a partir dos melhores indivíduos da geração anterior e dos indivíduos resultantes da reprodução destes. A reprodução é realizada a partir da função de cruzamento, onde os cromossomas, palavras binárias que compõem os indivíduos de uma população, trocam partes do seu código e criam novos indivíduos.

Para aumentar a variedade da população é inserida uma função de mutação, que consiste em criar um operador de mutação que altera aleatoriamente um ou mais bits de um cromossoma. Finalizada a reprodução, é calculado o *fitness* da nova geração e o processo repete-se até se obter a solução pretendida. A Figura 1 demonstra o processo de optimização descrito.

Neste trabalho o algoritmo foi programado utilizando a plataforma computacional Matlab. Para o cálculo da fiabilidade assumiu-se que a distribuição de falhas do equipamento segue uma distribuição de Weibull com dois parâmetros. Para estimar os parâmetros de Weibull utilizou-se a função *wblfit*, existente na *toolbox* do Matlab, que realiza a estimativa utilizando a metodologia do máximo denominador comum.

O algoritmo genético utilizado no processo de optimização foi extraído da metodologia proposta por Wang [18]. Segundo este método, todos os cromossomas solução presentes na população de potenciais soluções são compostos por números inteiro positivos, em substituição dos cromossomas binários normalmente utilizados, permitindo uma redução do tempo necessário para atingir a solução final do problema. Para a programação do algoritmo na plataforma computacional Matlab utilizou-se a adaptação do método anteriormente mencionado.

A vida virtual do equipamento é calculada através da equação (12) e o coeficiente de manutenção foi estimado utilizando o *software* MARS [19].

Para facilitar a interface entre o utilizador e o código de programação do algoritmo foi desenvolvida uma aplicação utilizando a ferramenta de interface visual (GUIDE) disponível na plataforma computacional Matlab. A Figura 2 ilustra o resultado final da aplicação desenvolvida.



Figura 1 -Processo de otimização por algoritmos genéticos

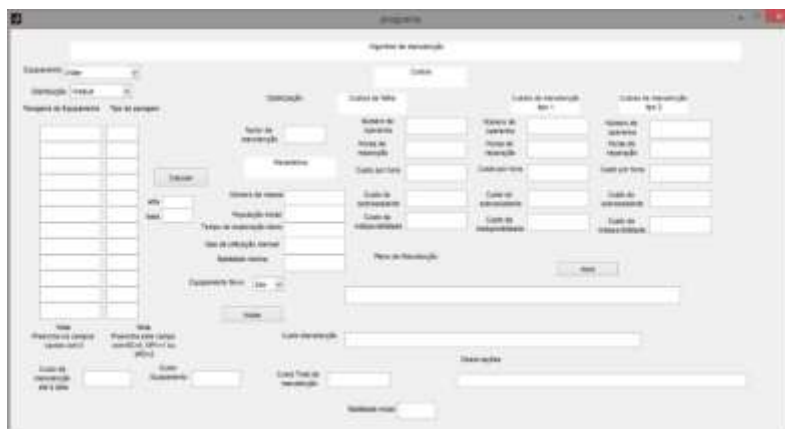


Figura 2 - Interface gráfica do algoritmo proposto

Para proceder ao planeamento da manutenção com base no algoritmo proposto é necessário dispor de alguns dados operacionais como por exemplo: dados referentes à ocorrência das falhas em unidade de tempo e os custos associados a cada tipo de manutenção. Para além, dos dados operacionais é necessário definir o horizonte temporal de planeamento assim como o fator de manutenção imperfeita.

5. Caso de estudo

Com o objectivo de ilustrar as vantagens do algoritmo proposto, este foi aplicado a um equipamento chiller condensado a ar, responsável pela climatização de uma escola secundária localizada em Lisboa.

À data da realização do estudo não se encontravam disponíveis dados históricos referentes às avarias do equipamento mencionado, pelo que se os dados referentes às falhas de um chiller, retirados de El-Berry e Al-Bossly [14].

Para a determinação do período de funcionamento do equipamento estudado considerou-se que o equipamento se encontra em funcionamento das 08:00 às 18:30, e que as instalações se encontram encerradas aos fins-de-semana e durante o mês de Agosto.

Com base nestes pressupostos, o regime de funcionamento da escola é de 10,5 horas por dia, 22 dias por mês, durante 11 meses por ano. Por outro lado, a gestão impôs que o valor

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente suportado pela FCT, através do IDMEC, no âmbito do LAETA UID/EMS/50022/2013, bem como, pela TDGI - Tecnologia de Gestão de Imóveis, SA.

Referências

- [1] B. S. Dhillon. *Reliability Engineering, A modern Approach*. p.89-107, CRC Press LLC, Florida, USA, 2002.
- [2] McKone, K.E.; Schroeder, R.G.; Cua, K.O.: "The impact of total productive maintenance practices on manufacturing performance", *Journal of Operations Management*, Vol.19, Issue 1, (2001), ISSN 0272-6963, pp.39-58.
- [3] International Atomic Energy Agency, *Implementation Strategies and Tools for Condition Based Maintenance at Nuclear Power Plants*, IAEA, 2007.
- [4] R. F. Stapelberg. *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering design*, Springer - Verlag London Limited, England, 2009.
- [5] Khan, F.I.; Haddara, M.M.: "Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning" *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.16, Issue 6, (2003), ISSN 0950-4230, pp.561-573.
- [6] Endrenyi, J.; Aboresheid, J.; Allan, R.N.; et al.: "The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance in reliability", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.16, Issue 4, (2001), ISSN 0885-8950, pp.638-646.
- [7] Kay, E.: "The effectiveness of preventive maintenance" *International Journal of Production Research*, Vol 14, Issue 3, (1976), ISSN 0020-7543, pp.329-344.
- [8] Rezg, N., Dellagi, S., Khatad, A. *Joint Optimization of Maintenance and Production Policies*, ISTE Ltd, 2014.
- [9] Wang, H.; Pham, H. *Reliability and Optimal Maintenance* Springer, ISBN: 978-1-84628-324-6.
- [10] Cunha, A.G.; Antunes, C.H.; Coello, C.C. *Evolutinary Multi-Criterion Optimizatin:8th International Conference, EMO 2015, part II*, Springer, Guimarães, Portugal, 2015.
- [11] Tsai, Y.T.; Wang, K. S.; Teng, H., Y.: "Optimizing preventive maintenance for mechanical components using genetic algorithms" *Reliability Engineering and Systems Safety*, Vol.74, Issue 1, (2001), ISSN 0951-8320, pp 89-97.
- [12] Moubray, J. *Reliability Centered Maintenance*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2nd edition, 1999.
- [13] Mettas, A.; Zhao, W. *Modeling and Analysis of Repairable Systems with General Repair. Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Alexandria, USA, 2005.
- [14] El-Berry, A.; Al-Bossly, A.: "Application of Computer Model to Estimate the Consistency of Air Conditioning Systems Engineering" *International Journal of Engineering Technology*, Vol.5, Issue 2, (2013), ISSN 0975-4024, pp.659-668.
- [15] Kijima, M.: "Some results for repairable systems with general repair" *Journal of Applied Statistichs*, Vol.26, Issue 9, (1989), ISSN 0021-9002, pp.89-102.
- [16] Doyen, L.; Gaudoin, O.: "Classes of imperfect repair models based on reduction of failure intensity or virtual age" *Reliability Engineering and Systems Safety*, Vol.84, Issue 1, (2002), ISSN 0951-8320, pp. 45-56.
- [17] Aljahdali, S.H., El-Telbany, M.E. *Software reliability prediction using multi-objective genetic algorithm. International Conference on computers systems*, Rabat, Marrocos, 10-13 May 2009.
- [18] Wang, Y.; Handschin, E.: "A new genetic algorithm for preventive unit maintenance scheduling of power systems" *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 22, Issue 5, (2000), ISNN 0412-0615, p346-348.
- [19] Corset, F.; Despréaux, S.; Doyen, L.; Gaudoin, O. *MARS: a software tool for maintenance assessment of repairable systems.*, MMR. 2009, Moscow, Russia, 2009.